

ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА ИЗ СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ РУД ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Ш.Ш. Аликулов¹, Р.Р. Ибрагимов², Р.А. Хамидов¹

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет,
Навои, Республика Узбекистан, e-mail: sharofovich@mail.ru

² Российский университет Дружбы народов, Москва, Россия

Аннотация: В настоящее время сырьевая база предприятий, добывающих уран методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), по большей части представлена бедными месторождениями гидрогенного генезиса, залегающими в водопроницаемых песчано-глинистых отложениях депрессионных зон земной коры. Вовлечение месторождений со слабопроницаемыми рудами в технологический цикл добычи и переработки может быть обеспечено главным образом путем интенсификации процесса ПСВ с применением различных физических и химических методов, направленных на увеличение проницаемости рудного массива при прохождении через него выщелачивающего раствора. Представлены результаты лабораторных экспериментов и натурных исследований по интенсификации процесса ПСВ слабопроницаемых руд урановых месторождений ГП «Навоиуран». Исследования направлены на повышение эффективности ПСВ с применением таких физических методов, как воздействие переменного тока на рудную массу, магнитная обработка кислотных растворов и применение ультразвуковых колебаний. Лабораторные эксперименты показали, что при воздействии переменного тока на рудный массив возрастает не только коэффициент фильтрации, но и скорость извлечения металла. Так, при пропускании тока плотностью 0,1–0,01 мА/см² коэффициент проницаемости увеличился в 1,2 раза. Результаты исследований, проведенных в натурных условиях, подтвердили полученный результат и показали увеличение дебита водоносных скважин в среднем в 5 раз. В задачи исследований по определению возможности магнитной обработки кислотных растворов при ПСВ входили оценка скорости выщелачивания омагниченным раствором, наблюдение за изменением проницаемости омагниченным раствором пород при выщелачивании и скорости выпадения механических примесей и гипса из омагниченных растворов. В ходе лабораторных экспериментов установлено, что омагничивание кислотных растворов способствует выпадению из них гипса и механических взвесей, что может иметь практическое значение для очистки технологических растворов. Исследование в лабораторных условиях влияния ультразвуковых колебаний на процесс фильтрационного выщелачивания показало, что помимо заметного возрастания скорости выщелачивания увеличивается концентрация металла в растворе.

Ключевые слова: подземное выщелачивание, слабопроницаемая урановая руда, электрический ток, электроосмос, электрофорез, электромагнитное поле, фильтрационное выщелачивание, проницаемость породы.

Для цитирования: Аликулов Ш. Ш., Ибрагимов Р. Р., Хамидов Р. А. Исследования интенсификации процесса скважинного подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд при воздействии на них различными физическими методами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 111–126. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_111.

Stimulation of in situ uranium leaching from low permeable ore in treatment by different physical methods

Sh.Sh. Alikulov¹, R.R. Ibragimov², R.A. Khamidov¹

¹ Navoi State University of Mining and Technology, Navoi, Republic of Uzbekistan, e-mail: sharofovich@mail.ru

² Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Abstract: The resources of in situ leach uranium mining mostly represent hydrogenous low-grade ore deposits in impermeable sandy and clayey sediments in the crustal depression zones. It is possible to involve low permeable ore in the mining and processing cycle chiefly by means of the in situ leaching stimulation using various physical and chemical methods aimed to enhance permeability of ore bodies for leaching solutions. This article describes the lab-scale experiments and full scale studies on stimulation of in situ leaching in low permeable uranium ore deposits of Navoi Uran. The studies aim to increase efficiency of in situ uranium leaching using such physical methods as ore treatment by alternating current, magnetic processing of acid solutions and application of ultrasonic vibrations. The lab-scale experiments show that alternating current stimulation raises both the permeation factor and the metal recovery rate. For example, the passage of alternating current at a density of 0.1–0.01 mA/cm² increases the permeability factor by 1.2 times. The full scale studies prove this result and exhibit the increased output of wet holes by 5 times on average. The capability testing of magnetic processing of acid solutions in the in situ leach technology included estimation of leaching velocity of magnetic solutions, observation of change in permeability of rocks with the magnetic solutions and determination of precipitation rates of mechanical impurities and gypsum in the magnetic solutions. The lab-scale experiments find that magnetization of acid solutions promotes precipitation of gypsum and mechanical impurities, which may be practically useful in purification of process solutions. The lab-scale investigation of ultrasonic vibration effect on leaching performance shows that both the leaching velocity and the metal concentration in solutions increase noteworthy.

Key words: in situ leaching, low permeable uranium ore, electric current, electro-osmosis, electrophoresis, electromagnetic field, permeation and leaching, rock permeability.

For citation: Alikulov Sh.Sh., Ibragimov R. R., Khamidov R. A. Stimulation of in situ uranium leaching from low permeable ore in treatment by different physical methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(2):111-126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_111.

Введение

Сырьевую базу предприятий, добывающих уран методом ПСВ, в настоящее время составляют главным образом бедные месторождения гидрогенного генезиса, залегающие в водопроницаемых

песчано-глинистых отложениях депрессионных зон земной коры [1, 2]. Эти месторождения, несущие в себе запасы урана, до последнего времени не были вовлечены в промышленную разработку традиционными способами добычи по

технико-экономическим соображениям. Эта важная задача, имеющая большое народнохозяйственное значение, к настоящему времени в значительной степени решена. Особенно в последнее десятилетие были проведены большие работы по разработке и внедрению в промышленных масштабах геотехнологической добычи урана, получившей название «метод ПСВ» [3–6]. Исходя из особенностей добычи урана способом ПСВ, в составе рудника ПСВ выделяют два основных производственных комплекса, характеризующихся законченным технологическим циклом – добычной и перерабатывающий [7–9].

Добычной комплекс [10–12] (полигон) ПСВ представляет собой комплекс подземных, наземных сооружений и технических средств, обеспечивающий подачу рабочих растворов в рудовмещающий водоносный горизонт для осуществления процесса ПСВ, а также откачку продуктивных растворов на поверхность и их транспортирование на соответствующий участок для последующей обработки.

Слабопроницаемые руды урановых месторождений ГП «Навоиуран» долгое время были занесены в технологический забаланс, поскольку высокая реагентоемкость пород и интенсивная кольматация не позволяли эффективно отрабатывать запасы традиционным сернокислотным способом. Существуют различные способы повышения извлечения урана в продуктивный раствор [13–14], но они отличаются дороговизной и технологическими сложностями их применения. Поэтому повышение эффективности ПСВ урана путем повышения его содержания в продуктивном растворе и снижения себестоимости добычи является актуальной задачей.

Оценивая воздействие гидрогеохимических особенностей данного месторождения, предстояло определиться с

технологией и конкретными геотехнологическими параметрами отработки: продуктивный водоносный горизонт имеет мощность 15–18 м с глубиной залегания кровли 150–180 м; пьезометрический (статический) уровень на глубине 70–90 м, напор на кровлю 80–100 м; коэффициент фильтрации 2–4 м/сут, удельный дебит в среднем 0,15–0,25 м³/м; верхняя часть верхнетуронского тохумбетского горизонта представлена слабопроницаемыми литологическими разностями (K_f до 0,5 м/сут) с небольшим содержанием карбонатов (< 0,5% CO₂) и сульфидов (~0,1%), а в нижней части указанные параметры резко возрастают: проницаемость – до 3–5 м/сут и более, содержание карбонатных минералов – до 3–4%, содержание сульфидных минералов – 2–3%. Указанные литолого-геохимические особенности руд и вмещающих пород осложняют процесс отработки месторождения, верхняя часть которого благоприятна для кислотного выщелачивания, а нижняя часть – для бикарбонатного выщелачивания [15].

Интенсификация процесса выщелачивания металлов воздействием на среду электрических полей различной частоты давно привлекает внимание исследователей [16–18]. Это объясняется большой проникающей способностью электрического тока через рудный массив, простотой подвода электрической энергии к блоку ПСВ, высоким КПД преобразования электрической энергии в другие виды энергии и возможным комплексным влиянием на эффективность извлечения металлов. Применительно к ПСВ урана известен метод воздействия на рудный массив постоянного электрического тока, который рекомендуется пропускать через электроды, помещенные в скважины. При этом выщелачивающий реагент и ионы растворенного урана, фильтруясь через пористое рудное тело, будут двигаться в направле-

нии созданного поля от нагнетательной скважины (выработки) к откачной скважине (дренажной выработке). Создание на участке блока поля постоянного электрического тока ведет, помимо повышения температуры реагента, к возникновению явлений электроосмоса и электрофореза, способствующих увеличению скорости фильтрации раствора и интенсивности растворения металла.

Методы исследований

Для изучения возможности интенсификации процесса скважинного подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд был проведен ряд опытов при воздействии на исследуемую породу различными физическими методами. Исследования проводили на пробе породы крупностью менее 2 мм. Гранулометрический состав песка был оценен по известной методике.

Для изучения изменения показателей ПСВ оценивали фильтрационные свойства и проницаемость породы до и после экспериментов. Для этого в вертикальную колонну высотой 1 м и диаметром 0,065 м утрамбовывали заранее подготовленный грунт и пропускали через него раствор. Вдоль колонны через каждые 10 см были проделаны отверстия, закрытые пробками. В ходе эксперимента через эти отверстия отбирались пробы для определения влажности и скорости фильтрации.

В лабораторных условиях проводили эксперименты по воздействию на породу переменного электрического тока. Для этого образец насыщали токопроводящей жидкостью и пропускали через него ток высокой плотности. Поверхность образца изолировали тефлоном. Далее изучалось изменение фильтрационных свойств анализируемых пород.

Нами разработаны и предложены для испытаний несколько принципиальных схем ввода переменного электрическо-

го тока промышленной частоты в блоки ПСВ урана с фильтрационным и пульсационно-статическим режимами. При неглубоком залегании рудного тела с естественным или искусственным водупором в почве, рациональной с точки зрения безопасности, может быть схема ввода электрического тока в блок по скважинам с расположенной на поверхности силовой установки. При этом на забое скважины на уровне рудного тела располагаются электроды, к которым по токопроводу подается необходимое напряжение.

Вторая схема предусматривает ввод электрического тока в блок по скважинам, пробуренным из горных выработок.

Третья схема предусматривает воздействие переменного электрического тока в блок горной породы через нагнетательную скважину. При этом две близлежащие параллельные горные выработки (нагнетательная и дренажная), могут быть использованы как система с противоположными по заряду потенциалами. Это создаст движение электрического тока через выщелачиваемую среду. Подачу потенциалов можно осуществить посредством погруженных в заполненные раствором выработки электродов с достаточной поверхностью контакта. Напряжение к электродам от силовой установки, расположенной на поверхности или в камерной выработке, подается по кабелю, пропущенному через раствор непроницаемой перемычкой [19].

Исследования по определению изменения скорости выщелачивания после магнитной обработки кислотных растворов проводили с использованием аппарата марки ПМУ-1. В аппарате омагничивался однопроцентный раствор серной кислоты с добавлением хлористого кальция. При этом образовывался гипс, который выпадал в осадок. Концентрацию веществ в растворе определяли с помощью электрофотокалориметра ФЭК-56М.

Таблица 1

Гранулометрический состав отсеянного песка
Granulometric composition of the sifted sand

Размеры фракций, мм	>1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,005	<0,005
Содержание, %	0,8	0,9	30,4	46,4	7,1	5,2	9,2

Влияние омагничивания на скорость осаждения механических примесей из растворов выполнены по известной методике седиментационного анализа. Для установления влияния магнитной обработки растворов были проведены эксперименты по выщелачиванию омагниченным и неомагниченным растворами.

Проведены эксперименты по выщелачиванию с применением ультразвуковых колебаний. Источником УЗК служил магнитострикционный излучатель УЗДН-1У-4,2 с интенсивностью излучения на конце экспоненциального конденсатора 1000 кВт/м² (частота 22 кГц).

Результаты исследований и их обсуждение

Для установления влияния воздействия переменного тока на движение растворов в песчано-глинистых породах предварительно определяли количество связанной (рыхлосвязанной и адсорбированной) воды и изменение коэффициента фильтрации в процессе фильтрации однопроцентного раствора серной кислоты. Фильтрационные исследования выполняли на рудном песке с примесью глин (1,5 и 10%) монтмориллонитового и гидрослюдистого состава. Количество адсорбционной (гигроскопической) воды определяли по ГОСТ 51080-64. Гигроскопическая влажность составила 2%. Количество рыхлосвязанной воды (максимальная молекулярная влажность) определяли методом высоких колонн.

Исследования проводили в следующей последовательности. Глинистый песок продуктивного горизонта просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Гранулометрический состав про-

сеянного песка (средний по трем пробам) представлен в табл. 1.

Минеральный состав песка (средний по трем пробам): кварц — 64,2%, полевые шпаты — 6,9%, глинистые минералы — 9,2%, прочие минералы — 19,7%. Во фракции 0,005 мм глинистые минералы содержат 76,8% гидрослюды и 23,2% каолинита. Определение минерального состава глин выполнено в аналитической лаборатории Министерства геологии Республики Узбекистан. Минеральный и гранулометрический состав песка определяли в лаборатории предприятия ПСВ. Песок содержит заметное количество глины, в которой преобладают минералы группы гидрослюды, занимающей промежуточное положение по набухаемости между минералами группы монтмориллонита и каолинита.

Песок помещали в вертикальную колонну (трубу из нержавеющей стали высотой 1 м и диаметром 0,065 м; с интервалами в 0,1 м в колонне вдоль ее оси проделаны отверстия, закрываемые пробками). Песок утрамбовывали и под напором в колонну подавали исследуемую жидкость до заполнения колонны. В таком состоянии породу выдерживали в течение суток, после чего нижнюю часть колонны открывали, жидкость под действием гравитационной силы вытекала. Через окошечки колонны отбирали пробы породы и определяли их влажность по стандартной методике. По результатам определений строили графики изменения влажности проб по длине колонны.

Было выполнено два подобных опыта: первый — на дистиллированной воде, второй — на продуктивных растворах с

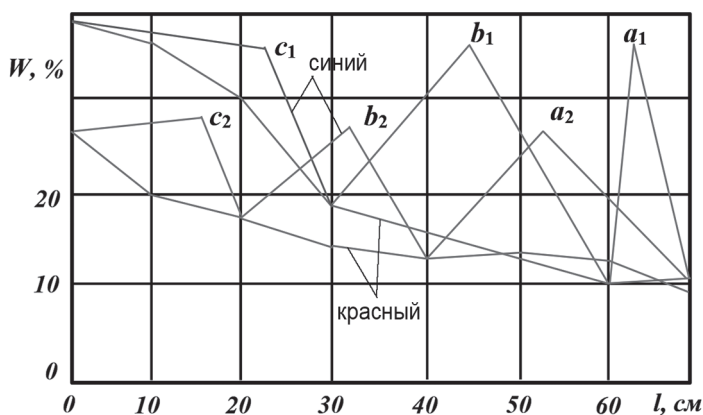


Рис. 1. Изменение влажности глинистого песка W по длине колонны l при опытах на геотехнологическом растворе (1) и дистиллированной воде (2)

Fig. 1. Change in the moisture content of clay sand W along the length of the column l during experiments on geotechnological solution (1) and distilled water (2)

опытно-промышленного участка ПСВ. Изменение влажности глинистого песка по длине колонны показано на рис. 1. Согласно методике, на графиках выделены сверху вниз три зоны: капиллярной влажности (a), максимальной молекулярной влажности (c), переходная (b). Как видно из рисунка, максимальная молекулярная влажность в опыте с дистиллированной водой составила 10% от массы породы, а в опыте с продуктивными растворами — 12%, что свидетельствует о некотором набухании глинистой фракции породы в растворе.

Результаты опытов показали, что при фильтрации выщелачивающего раствора по руде конкретное месторождения рыхлосвязанная вода, занимающая определенный поровый объем, создает гидравлическое сопротивление. Доля связанной воды в объеме пор 1 см^3 грунта при влажности 10% составит:

$$V = \frac{w \cdot \gamma_n}{100\% \gamma_B} = \frac{10\% \cdot 1,7}{100\% \cdot 1,0} = 0,17 \text{ см}^3 \quad (1)$$

где $w = 10\%$ — максимальная молекулярная влажность; $\gamma_n = 1,7 \text{ г/см}^3$ — удельный вес сухого песка; $\gamma_B = 1,0 \text{ г/см}^3$ — удельный вес воды.

Если учесть, что при пористости 40% пустоты в 1 см^3 породы занимают $0,4 \text{ см}^3$ объема, очевидна огромная роль связанной воды в фильтрационном процессе (в данном случае она занимает 42,5% объема пор).

Опыты по изучению влияния однопроцентного раствора серной кислоты на фильтрационные свойства руд в зависимости от содержания в них глини гидрослюдистого и монтмориллонитового составов проводили на 36 пробах. В опытах использовали искусственные пробы с нарушенной структурой, подготовленные следующим образом. Пробу рудного песка отмучивали от фракции менее $0,005 \text{ мм}$ по стандартной методике. Из отмученной и высушенной пробы готовили навески, в которые добавляли монтмориллонитовую и слюдистую глины с таким расчетом, чтобы они составляли 1,5 и 10% общей массы готовой пробы, которая составляла 70 г. Монтмориллонитовую глину брали из отвала карьера, вскрывшего продуктивный горизонт, гидрослюдистую глину — на глинистанции. В результате анализов установлен минеральный состав монтмориллонитовой (монтмориллонит 71%,

гидрослюда 26%, каолинит 3%) и гидрослюдистой (гидрослюда 74%, каолинит 26%) глин.

Всего приготовлено 36 проб из расчета по 6 проб на каждую концентрацию и вид глин. Далее пробы помещали в фильтрационную трубку длиной 0,12 м с площадью поперечного сечения $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. При засыпке песок в трубке послойно утрамбовывали и замачивали дистиллированной водой. После выдерживания пробы в стационарном положении в течение суток через нее начинали фильтровать дистиллированную воду под избыточным напором 0,45 м. Через каждую пробу было отфильтровано по 0,5 л дистиллированной воды. Вслед за водой фильтровали однопроцентный раствор серной кислоты в количестве, в 10 раз превышающем массу пробы (Ж:Т = 10).

В процессе фильтрации измеряли расход жидкости и ее температуру. На основании замеров вычисляли коэффициент проницаемости породы, D , по формуле

$$K_{II} = Ql\mu / (F \cdot \Delta P), \quad (2)$$

где Q — расход жидкости, $\text{см}^3/\text{с}$; l — длина образца, см ; μ — вязкость, сП ; F — площадь сечения образца, см^2 ; ΔP — перепад давления, $\text{кгс}/\text{см}^2$.

При анализе результатов опытов можно сделать вывод, что увеличение кон-

центрации глины существенно снижает проницаемость пород. Проницаемость пород, измеренная по кислому раствору, оказалась значительно ниже проницаемости, измеренной по дистиллированной воде. Следует отметить, что проявления газовой кольтмации в опытах не наблюдалось. Не было замечено в пробах новообразований (гипса), которые могли бы уменьшить проницаемость пород. По окончании выщелачивания пробы анализировали под микроскопом. Концентрация гипса в них составила 0,1%.

Исследования по выщелачиванию в трубках под воздействием переменного электрического тока на песчано-глинистых рудах двух месторождений составили вторую серию опытов. Для первого месторождения опыты проводили в трубках длиной 0,1 м с площадью поперечного сечения $4,1 \text{ см}^2$. Для второго месторождения использовали трубки длиной 0,275 м с площадью поперечного сечения $13,8 \text{ см}^2$. В первом случае содержание глины и алеврита в руде составляло 21%, во втором — около 15%. На концах трубок устанавливали перфорированные электроды.

Фильтрационные опыты проводились в двух трубках параллельно: в одной — с приложением электрического тока, в другой — без. Воздействие переменным электрическим током на породу прово-

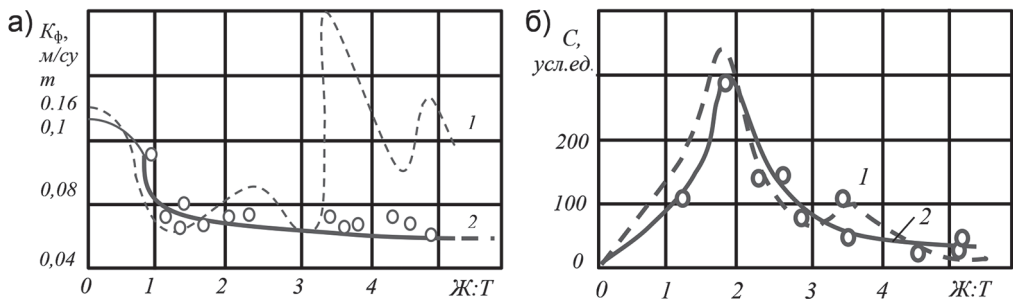


Рис. 2. Зависимость коэффициента фильтрации K_f (а) и концентрации металла в растворе C (б) от Ж:Т при периодическом воздействии электрическим током (1) и без воздействия (2)

Fig. 2. The dependence of the filtration coefficient K_f (a) and the concentration of metal in solution C (b) on L:S with periodic exposure to electric current (1) and without exposure (2)

дили периодически. Изменение коэффициента фильтрации и концентрации металла в растворе в зависимости от соотношения Ж:Т показано на рис. 2.

Как видно из рисунка, при воздействии электрического тока возрастает не только коэффициент фильтрации, но и скорость извлечения металла, а также концентрация металла в растворе. Возрастание коэффициента фильтрации интерпретируется нами как результат уменьшения вязкости раствора вследствие его нагрева при пропускании электрического тока и как результат перехода связанной воды в подвижное состояние, что приводит к увеличению эффективного сечения пор и, следовательно, к проницаемости породы.

Проведены лабораторные эксперименты, а также апробация в промышленных условиях по изучению возможности использования токов высокой плотности для перестройки структуры порового пространства песчано-глинистых пластов.

В лабораторных условиях через образцы различных типов пород, насыщенные проводящей жидкостью, пропускали ток высокой плотности. Образец представлял собой либо куб ($50 \times 50 \times 50$ мм), либо цилиндр (диаметр 15–25 мм, высота 50–80 мм). Поверхность образца изолировали тефлоном для предотвращения поверхностного пробоя. Ток пропускали через торцы образца (напряжение между электродами достигало 10 кВ). При превышении некоторой критической плотности тока, соответствующей данному типу горной породы, происходило разрушение сцементированных пород на макроуровне (образование отдельных частей, песка и т.п.), т.е. имел место электромеханический эффект — разрушение среды в результате повышения порового давления жидкости, нагреваемой при пропускании через нее электрического тока. При снижении плотности тока среда не разрушалась, но наблюдалось об-

ратимое изменение ее проницаемости. Даже в случае, когда начальная проницаемость имела значение около 400 мД, наблюдалось увеличение коэффициента проницаемости в 1,5–2 раза. Наиболее чувствительными к пропусканию тока являются образцы, содержащие глину. В этом случае для изменения проницаемости среды достаточно было пропустить ток, плотность которого не превышала $0,1 - 0,01$ мА/см².

В натуральных условиях проводили обработку технологических скважин в целях повышения их дебита вследствие улучшения фильтрационных свойств среды вблизи забоя скважины. В этом случае напряжение подвели к водоносному пласту непосредственно через обсадные колонны соседних скважин, расстояние между которыми составляло 5–30 м. Если в окрестности обрабатываемой скважины не было соседней скважины, второй электрод заземляли на расстоянии порядка глубины залегания водоносного горизонта (50–130 м). При обработке водоносного пласта использовали как постоянный, так и переменный ток. Положительный эффект от такой перемены изменялся слабо. Напряжение, подводимое к скважине, изменялось в интервале 76–800 В. С ростом напряжения существенно снижалось время обработки скважины, необходимое для увеличения ее дебита: $t \sim 1/U^2$, где U — напряжение между скважинами.

В результате обработки водоносных скважин их дебит возрастал в среднем в 5 раз. Особенно эффективно сказалось использование этого способа на разглинизации скважин после их бурения. В этом случае в результате создания градиентов давления на микроуровне удавалось проводить очистку фильтрационных каналов от глины, попавшей в них при бурении с использованием глинистого раствора. После проведения такой обработки ($U = 75$ В, $t = 2$ ч) при откачке

из скважины происходил вынос глинистых частиц, а дебит скважины увеличивался в 1,5–2 раза. После повторной обработки ($U = 75$ В, $t = 2$ ч) также наблюдались вынос глины и рост дебита скважины, однако уже менее значительно. При повышении напряжения между скважинами до 180 В удалось увеличить дебит скважины в 6–7 раз.

В настоящее время осваивается технология повышения проницаемости мало мощных (0,3–0,5 м) слабопроницаемых ($K_{\phi} < 0,008$ м/сут) пластов с использованием токов высокой плотности. При этом электромагнитное поле высокой напряженности обеспечивает заданную ориентацию движения продуктивных растворов в пласте.

Были проведены лабораторные исследования по определению возможности магнитной обработки кислотных растворов при ПВ. В задачи исследований

входили оценка скорости выщелачивания омагниченным раствором, наблюдение за изменением проницаемости омагниченным раствором пород при выщелачивании и скоростью выпадения механических примесей и гипса из омагниченных растворов.

Для обработки растворов использовали аппарат марки ПМУ-1, выпускаемый серийно заводом им. П.Л. Войкова, со следующими основными магнитными характеристиками: напряженность магнитного поля в зазорах 176–192 кА/м, скорость потока жидкости 1–2 м/с, производительность 0,0006–0,002 м³/с.

Восприимчивость сернокислотного раствора к магнитной обработке была установлена нами следующим образом. В аппарате омагничивался однопроцентный раствор серной кислоты ($pH = 1$), в который добавляли определенное количество хлористого кальция с таким

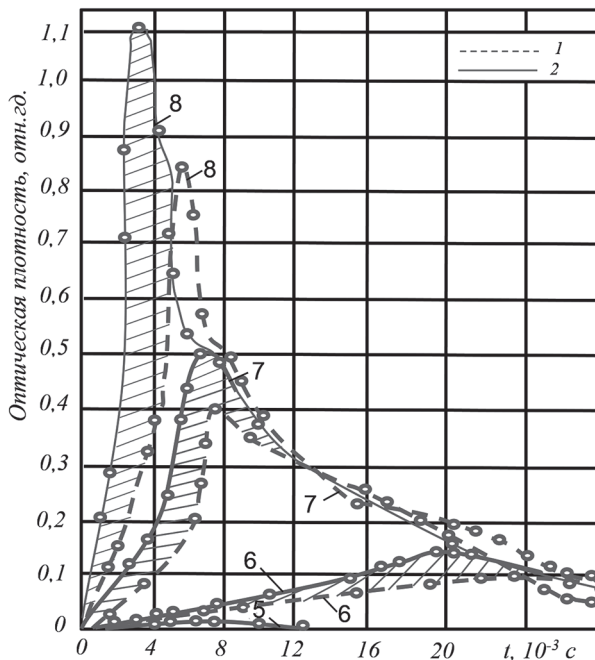
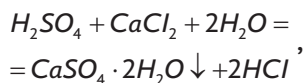


Рис. 3. Зависимость оптической плотности перенасыщенных гипсом омагниченного (1) и контрольного (2) кислотных растворов ($pH = 1$) от времени

Fig. 3. Dependence of the optical density of the magnetized (1) and control (2) acid solutions ($pH = 1$) supersaturated with gypsum on time

расчетом, чтобы теоретическое количество гипса, образовавшегося по реакции



составляло 5, 6, 7, и 8 г/л. Для каждой концентрации были построены зависимости оптической плотности растворов (рис. 3), измеренной с помощью электрофотокалориметра ФЭК-56М, от времени. Параллельно проводили контрольные опыты.

Установлено, что перенасыщение растворов наступало при концентрации гипса в растворе 6 г/л. Начиная с этой концентрации отмечался эффект от омагничивания, выразившийся в меньшей на 24–38% от максимальной оптической плотности омагниченных растворов по сравнению с максимальной оптической

плотностью контрольных неомагниченных растворов тех же концентраций. Это обусловлено тем, что скорость роста кристаллов гипса в омагниченных растворах значительно выше, чем в неомагниченных, что приводит к более интенсивному выпадению осадка.

Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о восприимчивости кислотного раствора к магнитной обработке и ее эффективности при осаждении насыщенных растворов гипса в кислой среде.

Опыты по определению влияния омагничивания на скорость осаждения механических примесей из растворов выполнены по известной методике седиментационного анализа. В мензурки (6 шт.) заливали омагниченный раствор объемом 50 мл, засыпали в них по 10 г глины,

Таблица 2

Зависимость изменения осветленной зоны от времени
Dependence of the change in the clarified zone on time

Время от начала опыта, с	Размер осветленной зоны, $\cdot 10^{-3}$ м, в мензурках						Среднее по шести мензуркам, $\cdot 10^{-3}$ м	Среднеквадратичное отклонение, $\pm 10^{-3}$ м
	1	2	3	4	5	6		
Омагниченный раствор								
300	7	7	8	8	8	8	7,67	0,19
600	17,5	17	18	17	18	18	17,58	0,20
1200	38	38	37	40	42	38	38,83	0,68
1800	50	53	53	54	56	50	52,67	0,87
3600	57,5	61	62,5	63	64	57	60,83	1,10
7200	63,5	67,5	69	69,5	69	63	66,90	1,09
10 800	66	70	71,5	72,5	72	65	69,50	1,31
Неомагниченный раствор								
300	7,5	8	7	7	8	7,5	7,50	0,17
600	16	18	17	16	18	17	17,00	0,33
1200	36	40	36	33	39	38	37,00	0,94
1800	52,5	54	51	50	51,5	51	51,67	0,52
3600	61	62	59	58	59,5	58,5	59,67	0,57
7200	67,5	69	65,5	65	65	65	66,17	0,62
10 800	70	71	68,5	68	68	68	68,92	0,50

Таблица 3

Скорость осаждения в омагниченном и неомагниченном растворах
Deposition rate in magnetized and non-magnetized solutions

Время от начала опыта, с	Скорость осаждения в омагниченном растворе, $\cdot 10^{-5}$ м/с	Скорость осаждения в неомагниченном растворе, $\cdot 10^{-5}$ м/с	Увеличение скорости, %
300	2,56	2,50	2,4
600	2,93	2,83	3,5
1200	3,24	3,08	5,2
1800	2,94	2,87	2,1
3600	1,69	1,66	1,8
7200	9,29*	9,19*	1,1
10 800	6,38*	6,38*	0,9
16 ⁻⁶ м/с			

перемешивали в течение 1 мин и наблюдали за ростом осветленной зоны со временем. Так же проводили опыты и на неомагниченном растворе. Минеральный состав глины: монтмориллонит 71%, гидрослюда 26%, каолинит 3%. Результаты замеров осветленной зоны в суспензиях, затворенных на омагниченном и неомагниченном технологических растворах, на различные моменты времени приведены в табл. 2. При сравнении средних значений можно найти, что при омагничивании технологического раствора осветленная зона растет несколько быстрее, но ввиду большой погрешности эксперимента для оценки влияния существенности фактора омагничивания требуется дисперсионный анализ. Результаты анализа, в частности расчетные скорости роста осветленной зоны в суспензиях, затворенных на омагниченном и неомагниченном технологических растворах (табл. 2), подтвердили значительность влияния фактора омагничивания на скорость роста осветленной зоны.

В экспериментах по фильтрационному выщелачиванию омагниченными кислотными растворами использовали песчано-глинистую руду с нарушенной структурой. Из породобразующих ми-

нералов в руде преобладают кварц (64,2%) и полевые шпаты (6,9%). Содержание карбонатов — 0,1 %. Перед употреблением технологическую пробу многократно перемешивали, затем квартовали. Из дважды отквартованной пробы отбирали навески для заполнения фильтрационных трубок (диаметром 0,2 и длиной 0,14 м). Как видно из табл. 3, максимальный эффект по увеличению скорости достигается через 20 мин от начала эксперимента, затем он закономерно снижается.

Для замера напоров каждая трубка снабжена двумя пьезометрами на входе и выходе. Породу в трубки засыпали послойно через воронки с замачиванием и виброуплотнением. Время виброуплотнения при частоте 100 Гц и виброускорении $9,8 \text{ м/с}^2$ составляло 120 с. Для выщелачивания использовали однопроцентный сернокислотный раствор и технологический раствор с действующего участка ПВ. Каждым видом раствора было выщелочено по 6 образцов, опыты по выщелачиванию проводили в 6 трубках. Через три из них пропускали омагниченный раствор. В ходе опытов измеряли расход жидкости, температуру и градиент напора, по которым рассчитывали коэффициент проницаемости, отбирали

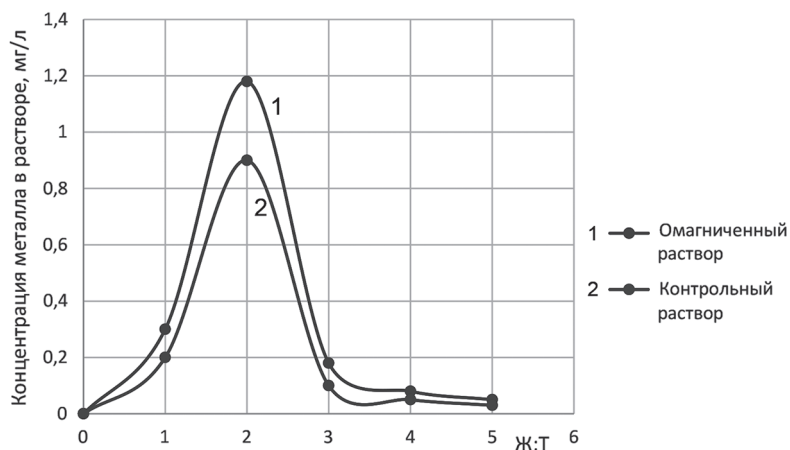


Рис. 4. Усредненные выходные кривые концентрации металла при фильтрационном выщелачивании
 Fig. 4. Averaged output curves of metal concentration during filtration leaching

жидкие пробы для определения концентрации металла.

Градиент напора в опытах составил 1,2–1,3 МПа. Средние по каждому трем трубкам выходные кривые концентрации металла показаны на рис. 4. Как видно из графиков, кривые концентрации полезного компонента практически идентичны для омагниченных и неомагниченных растворов.

Таким образом, в ходе лабораторных исследований установлено, что омагничивание кислотных растворов способствует выпадению из них гипса и механических взвесей, что может иметь практическое значение для очистки технологических растворов.

Проведены лабораторные опыты по изучению влияния ультразвуковых коле-

баний (УЗК) с частотой 22 кГц на процесс фильтрационного выщелачивания в колонках длиной 0,1 м.

Скорость выщелачивания под влиянием УЗК существенно возросла, поэтому для выявления расстояния, на котором еще проявляется интенсифицирующее воздействие УЗК, выполнены фильтрационные опыты по той же методике [20], отличающейся лишь тем, что между рудными участками длиной 0,1 м и ультразвуковым излучателем в фильтрационной колонне располагался участок с «пустой» породой (кварцевым песком) длиной 0,5 и 1 м. Выщелачивающий раствор подавали снизу через балластный слой кварцевого песка, а затем через руду. В качестве источника УЗК использовали магнитострикционный излу-

Таблица 4

Воздействие УЗК на выщелачивание
The impact of USV on leaching

№ опыта	Длина балластного слоя, м	Ж:Т	Средняя концентрация металла, мг/л
1, 2, 3	0,5	3,1±0,17	0,055±0,003*
4, 5, 6	0,5	2,7±0,10	0,072±0,001**
7, 8, 9	1,0	3,2±0,20	0,056±0,003**

* По трем опытам без УЗК; ** по трем опытам с УЗК.

чатель УЗДН-1У-4,2 с интенсивностью излучения на конце экспоненциального концентратора 1000 кВт/м² с частотой 22 кГц. Технологическая проба, на которой проводили исследования — кварц-полевошпатный песок с примесью глины 5%, содержала 0,018 — 0,021% полезного компонента. Перед исследованием руду тщательно перемешивали и квартовали. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Момент завершения выщелачивания определяли по методике В.А. Грабовникова [21] для крутых выходных кривых. Извлечение урана во всех опытах составило 93 — 94%.

При анализе результатов, приведенных в табл. 4, можно сказать, что при длине балластного слоя 1 м интенсифицирующее воздействие УЗК исчезает. Увеличение интенсивности УЗК эффекта не дает. Среда не способна передать колебания с большей интенсивностью вследствие чрезвычайно развитой кавитации и перераспределения энергии в высокие области частот, а также в результате снижения акустического импеданса среды, насыщенной пузырьками газа.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования подтвердили технологическую возможность интенсификации процесса ПСВ слабопроницаемых руд урановых месторождений ГП «Навоиуран» с применением ряда физических методов, таких как воздействие переменного тока на рудную массу, магнитная обработка кислотных растворов и применение ультразвуковых колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Андреев Б. Н., Голик В. И. Обоснование параметров буровзрывной подготовки руд к подземному блочному выщелачиванию // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3. — С. 58 — 71. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-58-71.

В частности, исследовано влияние воздействия переменного тока на движение растворов в песчано-глинистых породах. Результаты проведенных в лабораторных условиях экспериментов показали, что при пропускании электрического тока через горные породы коэффициент фильтрации повышается в 1,5 — 2 раза, как результат, это способствует увеличению скорости извлечения металла. Аналогичные результаты были получены при проведении экспериментов в натуральных условиях, при этом дебит откачных скважин увеличился в среднем в 5 раз.

Положительные результаты были получены также при проведении экспериментов по магнитной обработке кислотных растворов ПВ. В ходе исследования производилась оценка скорости выщелачивания омагниченным раствором. Установлено, что омагничивание кислотных растворов способствует интенсивному выпадению из них гипса и механических взвесей, за счет чего, собственно, и наблюдается увеличение скорости выщелачивания.

Увеличение скорости выщелачивания в лабораторных условиях было достигнуто также и воздействием на процесс ультразвуковых колебаний. Как показывают результаты эксперимента, помимо увеличения коэффициента фильтрации на 2 м/сут, соответственно повышается концентрация металла в растворах от 0,055 кг/м³ до 0,072 кг/м³.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что предложенные методы интенсификации процесса ПСВ могут быть рекомендованы для внедрения в производство.

2. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Ляшенко В. И. Особенности конструирования систем подземного выщелачивания металлов // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. — 2018. — Т. 19. — № 1. — С. 80–91. DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-1

3. Голик В. И., Заалишвили В. Б., Разоренов Ю. И. Опыт добычи урана выщелачиванием // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 7. — С. 98–103.

4. Hoummady E., Golfier F., Cathelineau M., Neto J., Lefevre E. A study of uranium-ore agglomeration parameters and their implications during heap leaching // Minerals Engineering. 2018, vol. 127, pp. 22–31.

5. Юсупов Х. А., Алиев С. Б., Джакупов Д. А., Эльжанов Э. А. Применение бифторида аммония для химической обработки скважин при подземном выщелачивании урана // Горный журнал. — 2017. — № 4. — С. 57–60. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.11.

6. Collet A., Regnault O., Ozhogin A., Imantayeva A., Garnier L. Three-dimensional reactive transport simulation of Uranium in situ recovery: Large-scale well field applications in Shu Saryssu Bassin, Tortkuduk deposit (Kazakhstan) // Hydrometallurgy. 2022, vol. 211, article 105873. DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105873.

7. Panfilov M., Uralbekov B., Burkitbayev M. Reactive transport in the underground leaching of uranium: Asymptotic analytical solution for multi-reaction model // Hydrometallurgy. 2016, vol. 160, pp. 60–72. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.11.012.

8. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. 2015, vol. 157, pp. 306–324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.

9. Bhargava S. K., Ram R., Pownceby M., Grocott S. Ring B., Tardio J., Review L. J. A review of acid leaching of uraninite // Hydrometallurgy. 2014, vol. 151, pp. 10–24. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.10.015.

10. Laurent G., Izart C., Lechenard B., Golfier F., Marion P., Collon P., Truche L., Royer J. J., Filippov L. Numerical modelling of column experiments to investigate in-situ bioleaching as an alternative mining technology // Hydrometallurgy. 2019, vol. 188, pp. 272–290. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.07.002.

11. Zammit C. M., Brugger J., Southam G., Reith F. In situ recovery of uranium – The microbial influence // Hydrometallurgy. 2014, vol. 150. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.06.003.

12. Ракишев Б. Р., Язиков Е. Г., Матаев М. М., Кенжетаяев Ж. С. Выщелачивание урана из материала керновых проб в трубках с применением окислителя // Горный журнал. — 2021. — № 9. — С. 84–89. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.14.

13. Chen J., Zhao Y., Song Q., Zhou Z., Yang S. Exploration and mining evaluation system and price prediction of uranium resources // Mining of Mineral Deposits. 2018, vol. 12, no. 1, pp. 85–94. DOI: 10.15407/mining12.01.085.

14. Аликулов Ш. Ш., Нажимов Ф. Ф. Анализ базовой модели подземного выщелачивания урана к природным условиям месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 1. — С. 98–104.

15. Лисовский Г. Д., Лобанов Д. П., Назаркин В. П. и др. Подземное и кучное выщелачивание металлов. — М.: Недра, 1982. — 113 с.

16. Rakishev B. R., Matayev M. M., Kenzhetayev Z. S., Shampikova A. H., Toktaruly B. Innovative methods for intensifying borehole production of uranium in ores with low filtration characteristics // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2020, vol. 6, no. 444, pp. 213–219. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.149.

17. Аликулов Ш. Ш. Интенсификация технологических процессов подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // Известия вузов. Горный журнал. — 2017. — № 1. — С. 78–81.

18. Аликулов Ш. Ш., Курбанов М. А., Шарафутдинов У. З., Халимов И. У. Исследование гидродинамических параметров при подземном выщелачивании путем физического моделирования // Горный вестник Узбекистана. — 2019. — № 1. — С. 77–82.

19. Аликулов Ш. Ш., Ахадов Х. Р. Разработка технологии раздельного скважинного выщелачивания урана на основе геофизических исследований в условиях рудников Навоийского горно-металлургического комбината // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12. – С. 120–131. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_120.

20. Sharafutdinov U. Z., Karimov I. A., Alikulov Sh. Sh. Applying the Fe^{+3} oxidizer as an improvement in the efficiency of uranium extraction // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. 2021, vol. 12, no. 7, pp. 384–386. DOI: 10.17762/turcomat.v12i7.2592. **MIAB**

REFERENCES

1. Lyashenko V. I., Khomenko O. E., Andreev B. N., Golik V. I. Justification of drill and blast pattern designs for ore treatment before in-situ leaching. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3, pp. 58–71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-58-71.

2. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Lyashenko V. I. Features of designing systems of underground leaching of metals. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya.* 2018, vol. 19, no. 1, pp. 80–91. [In Russ]. DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-1

3. Golik V. I., Zaalishvili V. B., Razorenov Yu. I. Experience of uranium extraction by leaching. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 7, pp. 98–103. [In Russ].

4. Houmady E., Golfier F., Cathelineau M., Neto J., Lefevre E. A study of uranium-ore agglomeration parameters and their implications during heap leaching. *Minerals Engineering.* 2018, vol. 127, pp. 22–31.

5. Yusupov Kh. A., Aliev S. B., Dzhakupov D. A., Elzhanov E. A. Application of ammonium bifluoride for chemical treatment of wells in underground uranium leaching. *Gornyi Zhurnal.* 2017, no. 4, pp. 57–60. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.11.

6. Collet A., Regnault O., Ozhogin A., Imantayeva A., Garnier L. Three-dimensional reactive transport simulation of Uranium in situ recovery: Large-scale well field applications in Shu Saryssu Bassin, Tortkuduk deposit (Kazakhstan). *Hydrometallurgy.* 2022, vol. 211, article 105873. DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105873.

7. Panfilov M., Uralbekov B., Burkitbayev M. Reactive transport in the underground leaching of uranium: Asymptotic analytical solution for multi-reaction model. *Hydrometallurgy.* 2016, vol. 160, pp. 60–72. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.11.012.

8. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy.* 2015, vol. 157, pp. 306–324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.

9. Bhargava S. K., Ram R., Pownceby M., Grocott S. Ring B., Tardio J., Review L. J. A review of acid leaching of uraninite. *Hydrometallurgy.* 2014, vol. 151, pp. 10–24. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.10.015.

10. Laurent G., Izart C., Lechenard B., Golfier F., Marion P., Collon P., Truche L., Royer J. J., Filippov L. Numerical modelling of column experiments to investigate in-situ bioleaching as an alternative mining technology. *Hydrometallurgy.* 2019, vol. 188, pp. 272–290. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.07.002.

11. Zammit C. M., Brugger J., Southam G., Reith F. In situ recovery of uranium – The microbial influence. *Hydrometallurgy.* 2014, vol. 150. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.06.003.

12. Rakishev B. R., Yazikov E. G., Mataev M. M., Kenzhetaev Z. S. Studies of uranium leaching from core sample in tubes using an oxidizer. *Gornyi Zhurnal.* 2021, no. 9, pp. 84–89. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.14.

13. Chen J., Zhao Y., Song Q., Zhou Z., Yang S. Exploration and mining evaluation system and price prediction of uranium resources. *Mining of Mineral Deposits.* 2018, vol. 12, no. 1, pp. 85–94. DOI: 10.15407/mining12.01.085.

14. Alikulov Sh. Sh., Nakhimov F. F. Analysis of the basic model of underground leaching of uranium to the natural conditions of the deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 1, pp. 98–104. [In Russ].

15. Lisovsky G. D., Lobanov D. P., Nazarkin V. P., etc. *Podzemnoe i kuchnoe vyshchelachivanie metallov* [Underground and heap leaching of metals], Moscow, Nedra, 198, 113 p.

16. Rakishev B. R., Matayev M. M., Kenzhetayev Z. S., Shampikova A. H., Toktaruly B. Innovative methods for intensifying borehole production of uranium in ores with low filtration characteristics. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2020, vol. 6, no. 444, pp. 213–219. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.149.

17. Alikulov Sh. Sh. Intensification of technological processes of underground leaching of uranium from weakly permeable ores. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2017, no. 1, pp. 78–81. [In Russ].

18. Alikulov Sh. Sh., Kurbanov M. A., Sharafutdinov U. Z., Khalimov I. U. Investigation of hydrodynamic parameters during underground leaching by physical modeling. *Gorniy vestnik Uzbekistana*. 2019, no. 1, pp. 77–82. [In Russ].

19. Alikulov Sh. Sh., Akhadov Kh. R. Separate borehole uranium leaching technology based on geophysical exploration: A case-study of mines of Navoi Mining and Metallurgical Combinat. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 12, pp. 120–131. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_120.

20. Sharafutdinov U. Z., Karimov I. A., Alikulov Sh. Sh. Applying the Fe⁺³ oxidizer as an improvement in the efficiency of uranium extraction. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*. 2021, vol. 12, no. 7, pp. 384–386. DOI: 10.17762/turcomat.v12i7.2592.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аликулов Шухрат Шарофович¹ — д-р техн. наук,
доцент, проректор, e-mail: sharofovich@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0142-1125,

Ибрагимов Равшан Раимович — ассистент кафедры,
Российский университет Дружбы народов,
e-mail: Ibragimov.r.r.asistent@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-0815-7267,

Хамидов Рустам Абдугафурович¹ — д.ф.т.н. (PhD),
доцент, e-mail: hamidov-88@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8998-6571,

¹ Навоийский государственный горно-технологический
университет, Республика Узбекистан.

Для контактов: Аликулов Ш.Ш., e-mail: sharofovich@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sh.Sh. Alikulov¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Vice-rector, e-mail: sharofovich@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0142-1125,

R.R. Ibragimov, Assistant of Chair,
Peoples' Friendship University of Russia
(RUDN University), 117198, Moscow, Russia,
e-mail: Ibragimov.r.r.asistent@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-0815-7267,

R.A. Khamidov¹, PhD, Assistant Professor,
e-mail: hamidov-88@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8998-6571,

¹ Navoi State University of Mining and Technology,
210100, Navoi, Republic of Uzbekistan.

Corresponding author: Sh.Sh. Alikulov, e-mail: sharofovich@mail.ru.

Получена редакцией 21.07.2022; получена после рецензии 19.08.2022; принята к печати 10.01.2023.
Received by the editors 21.07.2022; received after the review 19.08.2022; accepted for printing 10.01.2023.